数理解析研究所講究録
283巻 1976年 84-108

TOPOLOGICALLY STABLE UNFOLDINGS II

千葉大理 福田 拓生

INTRODUCTION [F1] において，関数の topologically stable unfolding の存在，唯一性，余次元一定のときの有限性について考察した。写像芽に関しても，同様の考察により次の定理を証明することができる。

<u>定理</u> 次元 r を任意に固定したとき，次元 r の topologically stable unfolding をもつ写像芽の位相型とそれらの top. stable unfolding の位相型は有限個である。

この定理の証明において，THOM の isotopy lemma と C^0-sufficiency に関する定理（§2 定理2.3 p7）が基本的役割をはたす。この定理2.3 を仮定すれば，上の定理は[F1] におけると同様に証明できることを一言注意して，上の定理の証明は他の場所にゆずり，ここでは C^0-sufficiency に関する定理のみを証明する。

ここでの議論は実C^∞級でなされているが，Complex analytic の場合にそのまゝ翻訳できる。証明中 Whitney stratification の概念と Thom の isotopy lemma が使われるが [M1], [F2] を参照のこと。上の定理にある stable unfolding の定義は§1でなされる。

目　次

§1 unfoldings

<u>定義1.1</u>　C^∞級写像 $f_i: M_i \to N_i$, $i=1,2$ が <u>C^0-同値</u> (C^0-equivalent) であるとは，同相写像 $h: M_1 \to M_2$ と $h': N_1 \to N_2$ が存在して，$f_2 \circ h = h' \circ f_1$ が成立つときにいう。写像芽の C^0-同値についても同様に定義する。

<u>定義1.2</u>　C^∞級写像芽 $f: (\mathbb{R}^m, a) \dashrightarrow (\mathbb{R}^n, c)$ に対して，C^∞級写像芽 $F: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^r, (a,b)) \dashrightarrow (\mathbb{R}^n, c)$ が条件

$$F(x, b) = f(x) \qquad x \in \mathbb{R}^m$$

を満たすとき F を f の b を中心とする <u>r次元開折</u> <u>(unfolding)</u> という。

定義1.3　$F:(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r,(a,b))\dashrightarrow(\mathbb{R}^n,c)$ 及び $G:(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^s,(a',b'))\dashrightarrow(\mathbb{R}^n,c')$ をそれぞれ $f:(\mathbb{R}^m,a)\dashrightarrow(\mathbb{R}^n,c)$ 及び $g:(\mathbb{R}^m,a')\dashrightarrow(\mathbb{R}^n,c')$ の開折とする。そのとき写像芽の組 $\Phi=(H_1,H_2,\varphi)$ が次の条件をみたすとき Φ を G から F への C^0級開折圏射とよぶ：

(1) $H_1:(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^s,(a',b'))\dashrightarrow(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r,(a,b))$

$H_2:(\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}^s,(c',b'))\dashrightarrow(\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}^r,(c,b))$

$\varphi:(\mathbb{R}^s,b')\dashrightarrow(\mathbb{R}^r,b)$

は連続写像芽で次の図式が可換となる。

$$\begin{tikzcd}
\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r \arrow[r, "F\times id_{\mathbb{R}^r}"] & \mathbb{R}^n\times\mathbb{R}^r \arrow[r, "\pi"] & \mathbb{R}^r \\
\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^s \arrow[u, "H_1"'] \arrow[r, "G\times id_{\mathbb{R}^s}"] & \mathbb{R}^n\times\mathbb{R}^s \arrow[u, "H_2"'] \arrow[r, "\pi"] & \mathbb{R}^s \arrow[u, "\varphi"']
\end{tikzcd}$$

但し $F\times id_{\mathbb{R}^r}(x,u)=(F(x,u),u)$ ，$\pi(y,u)=u$.

(2) $H_1(x,u)=(h_{1,u}(x),\varphi(u))$ ，$H_2(y,u)=(h_{2,u}(x),\varphi(u))$

とかけるが，$h_{1,u}:\mathbb{R}^m\to\mathbb{R}^m$ 及び $h_{2,u}:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^n$ は共に homeomorphism の芽である。

$\Phi=(H_1,H_2,\varphi)$ が G から F へ C^0級開折圏射であることを記号 $\Phi:G\to F$ であらわす。

<u>定義1.4</u>　開折圏射　$\Phi=(H_1,H_2,\varphi):G\to F$ が <u>C^0級開折同型</u> であるとは H_1, H_2, φ が それぞれ homeomorphism であるときにいう。開折圏同型 $\Phi:G\to F$ が存在するとき F と G は 開折として <u>C^0-equivalent</u> であるという。

<u>定義1.5</u>　f の開折 F が f の <u>C^0-普遍開折</u>であるとは，f の他の任意の開折 G に対して，開折圏射 $\Phi: G\to F$ が存在するときにいう。

<u>定義1.6</u>　$f:(\mathbb{R}^m,a)\to(\mathbb{R}^n,c)$ の開折 $F:(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r,(a,b))\longrightarrow(\mathbb{R}^n,c)$ が <u>C^0-安定開折(topologically stable unfolding)</u> であるとは，点 (a,b) の任意の近傍 $U\subset\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r$ と F の任意の代表元 $\tilde{F}\in C^\infty(U,\mathbb{R}^n)$ に対して $\tilde{F}$ の $C^\infty(U,\mathbb{R}^n)$ における Whitney 位相での近傍 $N(\tilde{F})$ が存在して 次の条件をみたすときにいう：

　(条件)　任意の写像 $\tilde{G}\in N(\tilde{F})$ に対して 点 $(a',b')\in U$ が 存在して $\tilde{G}$ の (a',b') における写像芽

$$G:(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^r,(a',b'))\longrightarrow(\mathbb{R}^n,c'),\quad c'=\tilde{G}(a',b')$$

が r次元開折として F に C^0-同値 になる。

<u>定義1.7</u>　$\mathbb{R}^m$ から $\mathbb{R}^r$ への C^∞級写像の芽全体の集合を

$\mathcal{E}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ であらわす。 C^∞級写像芽 $f:(\mathbb{R}^m, a) \to (\mathbb{R}^n, c)$ の <u>topological codimension</u> が r以下（<u>top codim $f \leq r$</u>）であるとは，次の条件をみたすときにいう：

（条件） $f \in M$ なる codimension $\leq m+r$ の $\mathcal{E}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ の smooth な submanifold M が存在し，任意の２元 $g, h \in M$ は互いに C^0-同値な C^0-安定開折をもつ。

但し，$\pi_k : \mathcal{E}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n) \to J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ を写像芽にその k-jet を対応させる自然な射影とするとき，$\mathcal{E}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ の部分集合 M が codimension $\leq m+r$ の <u>smooth な submanifold</u> であるとはある $k \geq 0$ に対して smooth な codim $\leq m+r$ の submanifold $M_k \subset J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ が存在して $M = \pi_k^{-1}(M_k)$ となるときにいう

<u>§2 C^0-k-determinacy.</u>

<u>定義2.1</u> k-jet $z \in J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ が <u>C^0-sufficient jet</u> であるとは，z の代表元である任意の写像芽 f, g が互いに C^0-同値になるときにいう。 又 写像芽 f が <u>C^0-k-determinate</u> であるとは f の k-jet が C^0-sufficient であるときにいう。

C^0-k-determinacy に関して次の古典的結果がある。

<u>補題2.2</u>（Thom［T］） 任意の自然数の組 $(r;m,n)$ に対して (r,m,n) のみで定まる自然数 $s=s(r;m,n)\geq r$ が存在して次の条件をみたす。

(1) $\pi=\pi_r^s: J^s(m,n)\longrightarrow J^r(m,n)$ を自然な射影とするとき，任意の jet $z\in J^r(m,n)$ に対して，$\pi^{-1}(z)$ の proper な代数的部分集合 Σ_z（これを<u>分岐多様体</u>という）が存在する。

(2) $j^s f(0)\in\pi^{-1}(z)-\Sigma_z$ ならば f は C^0-s-determinate である。

［T］においては数 $s=s(r;m,n)$ は全然評価されてない。我々は本稿で，この $s=s(r;m,n)$ を次の様に評価できる：

$$(*)\quad s(r;m,n)=\begin{cases} r+\left[\dfrac{m}{n-m+1}\right]+1 & \text{if } m\leq n \\ r+n+1 & \text{if } m\geq n \end{cases}$$

更に上の補題は次のように改良できる。

定理2.3　$\Delta=\Delta(r:m,n)$ を上の(*)で与えるとき，任意の semi-algebraic set $W\subset J^r(m,n)$ に対して closed semi-algebraic subset $\Sigma_W\subset(\pi_r^\Delta)^{-1}(W)$ で次の条件をみたすものが存在する。

(1)　$\dim\Sigma_W<\dim(\pi_r^\Delta)^{-1}(W)$

(2)　$j^\Delta f(0)\in\pi^{-1}(W)-\Sigma_W$ ならば 制限写像

$$f|C(f):C(f)\longrightarrow\mathbb{R}^n$$

は finite-one map である，ここに $C(f)$ は f の特異点の集合をあらわす。

(3)　$\pi^{-1}(W)-\Sigma_W$ の jet は全て sufficient jet である。更に，もし f_1 と f_2 の Δ-jet $j^\Delta f_1(0)$ と $j^\Delta f_2(0)$ が $(\pi_r^\Delta)^{-1}(W)-\Sigma_W$ の同じ連結成分に属すならば，f_1 と f_2 は C^0-同値である。

Introduction における stable unfolding の有限性に関する定理の証明において，基本的役割を果すのは トムの isotopy lemma，多項式写像の stratification 及び この定理である。以下 この定理の証明についやされる。

§3 関数の場合の定理2.3の証明

関数の場合も写像等の場合も　定理2.3の証明の原理は同じであるが，関数の場合の証明は，写像等のそれに比して非常に簡単であるので，証明の方針の見通しをよくするため，証明を関数の場合と写像の場合に分ける。

次の elementary な　補題を準備する。

<u>補題3.1</u>　任意の写像 $f=(f_1,\dots,f_n)\in C^\infty(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)$ と任意の点 $p\in\mathbb{R}^m$ 及び任意の整数の組 $r,s\geqq 0$ に対して，次数 $r+s+1$ の多項式写像 $h_p=(h_{1,p},\dots,h_{n,p}):\mathbb{R}^m\to\mathbb{R}^n$

$$(*)\qquad h_{i,p}=\sum_{|\omega|\leq r+s} a_{i\omega}(p)\,x^\omega$$

で 次の条件をみたすものが存在する：

(1)　$J^r h_p(0)=J^r f(0)$

(2)　$J^s h_p(p)=J^s f(p)$

(3)　$J^{r+s+1}h_0(0)=J^{r+s+1}f(0)$

更に

(4)　$h_{i,p}$ の係数 $a_{i\omega}(p)$ は p に依存するが，それは p の C^∞ 級関数であるようにえらべる。

<u>証明</u>　$n=1$ のときに証明すれば充分である。

関数 g の点 p における l 次の Taylor 級数を $\tau_p^l g$ であらわす。すなわち

$$(5)\quad \tau_p^l g(x) = \sum_{|\omega|\leq l} \frac{1}{\omega!} \frac{\partial^{|\omega|} g}{\partial x^\omega}(p)\,(x-p)^\omega .$$

原点において r 次の flat な関数 f, すなわち

$$(6)\quad \frac{\partial^{|\omega|}}{\partial x^\omega} f(0) = 0 \qquad 0\leq |\omega| \leq r+$$

なる f に対して補題を証明すれば充分である。実際，任意の f に対して $g = f - \tau_0^{r} f$ は原点において r 次まで flat であり，g に対して補題の条件をみたす多項式 h_p' が存在すれば $h_p(x) = h_p'(x) + \tau_0^{r} f$ は f に対して補題の条件をみたす。

従って f は原点において r 次まで flat とする。そのような f に対して f は次の形にかける（J. Milnor, Morse theory (p5) lemma 2.1 参照）

$$(7)\quad f(x) = \sum_{|\omega| = r+1} x^\omega f_\omega(x)$$

従って

$$(8)\quad f(x) = x^\omega g(x) \qquad \text{for some } \omega = (\omega_1, \ldots, \omega_m),\ |\omega| = \omega_1 + \cdots + \omega_m = r+1$$

なる形の関数に対して補題を証明すればよい。所で

(9) $h_p(x) = x^\omega \tau_p^s(g(x))$

とおけば 条件 (1) (3) (4) は明らかにみたされる。条件(2)は

(10) $\tau_p^\ell(g_1 g_2) = \tau_p^\ell(\tau_p^\ell g_1 \tau_p^\ell g_2)$

が任意の二つの関数 g_1, g_2 に対して成立つので明らかである。実際

$$\tau_p^s(h_p(x)) = \tau_p^s(x^\omega \tau_p^s(g(x))) = \tau_p^s(\tau_p^s(x^\omega)\tau_p^s(g(x)))$$
$$= \tau_p^s(x^\omega g) = \tau_p^s(f)$$

Q.E.D.

定理2.3 を関数の場合に限ると 次の形になる。

定理3.2 任意の semi-algebraic set $W \subset J^r(m,1)$ に対し, closed semi-algebraic set $\Sigma_W \subset (\pi_r^{r+2})^{-1}(W)$ で次の条件をみたすものが存在する。

(1) $\dim \Sigma_W < \dim(\pi_r^{r+2})^{-1}(W)$

(2) $j^{r+2}f(0) \in (\pi_r^{r+2})^{-1}(W) - \Sigma_W \Longrightarrow 0 \in \mathbb{R}^m$ は f の孤立特異点である。

(3) 任意の jet $z \in \pi^{-1}(W) - \Sigma_W$ は sufficient

(4) 更に, もし 関数芽 f, g の $(r+2)$-jet

$j^{r+2}f(0)$ と $j^{r+2}g(0)$ が $\pi^{-1}(W)-\Sigma_W$ の同じ連結成分に属すならば f と g は C^0-同値である。

記号　集合 $M(k)=\{0,1,2,\ldots,k\}$ の m 個のコピーの直積 $M(k)^m$ の元 $\alpha=(\alpha^1,\ldots,\alpha^m)$ に対して

$$\deg\alpha=\alpha^1+\cdots+\alpha^m \quad \text{と定める。}$$

$$C(m,k)=\{\alpha\in M(k)^m \mid \deg\alpha=k\} \quad \text{とおく。}$$

$C(m,k)$ は有限集合でその濃度 $\# C(m,k)=(m+k-1)!/k!(m-1)!$

$C(m,k)=\{\alpha_1,\ldots,\alpha_N\}$ と適当に順序づける。$N=\# C(m,k)$.

$\mathbb{R}^N$ の元 $(a_1,\ldots,a_N)$ に対して斉次式 $\sum_{i=1}^N a_i X^{\alpha_i}$ を

$$\sum a_i X^{\alpha_i}=\sum_{i=1}^N a_i X_1^{\alpha_i(1)}\cdots X_m^{\alpha_i(m)}$$

で定義する，但し $\alpha_i=(\alpha_i(1),\ldots,\alpha_i(m))$。

特に ~~C(m,~~ $k=r+1$, $r+2$ のとき，

$$C(m,r+1)=\{\alpha_1,\ldots,\alpha_\mu\} \qquad \mu=\# C(m,r+1)$$

$$C(m,r+2)=\{\beta_1,\ldots,\beta_\nu\} \qquad \nu=\# C(m,r+2)$$

とおく。

定理3.2の証明　$z\in W\subset J^r(m,1)$ とし，z が r 次の多項式 $y=P_z(x)$ で代表されるとする。すると次の1対1

対応が自然に得られる。

$$(\pi^{r+2}_{r})^{-1}(W)=\{\text{polynomials }\ y=P_z(x)+\sum_{i=1}^{\mu}a_i x^{\alpha_i}+\sum_{j=1}^{\nu}b_j x^{\beta_j}\}$$

$$\Big\updownarrow \text{1対1}$$

$$\{(z,a_1,\dots,a_\mu,b_1,\dots b_\nu)\}=W\times\mathbb{R}^\mu\times\mathbb{R}^\nu$$

$$\Omega=\{(x,z,a,b)\}=\mathbb{R}^m\times W\times\mathbb{R}^\mu\times\mathbb{R}^\nu$$

$$O=\{(x,z,a,b)\in\Omega \mid P_{a,b,z}(x)=P_z(x)+\sum a_i x^{\alpha_i}+\sum b_j x^{\beta_j}=0\}$$

$$S=\{(x,z,a,b)\in\Omega \mid d_x P_{a,b,z}(x)=0\}$$

$$Q=\{(0,z,a,b)\} \qquad \text{とおく。}$$

Qと $W\times\mathbb{R}^\mu\times\mathbb{R}^\nu$ 及び $(\pi^{r+2}_{r})^{-1}(W)$ を同一視する。

Wが semi-algebraic な manifold として一般性を失なわない。Ωの stratification $\mathcal{S}(\Omega)$ で，Q, $S\cap O$, S, O がそれぞれ Ω の substratified set になるようなものが存在する。(see [F₂])

$$\Sigma_W=\overline{\bigcup_{\substack{X\in\mathcal{S}(Q)\\ \dim X<\dim Q}} X}$$

, $\mathcal{S}(Q)$は上のΩの substratified set として与えられたQの stratification

とおくと，これが求めるものである。まず Σ_W は $Q=\pi^{-1}(W)$ の closed semi-algebraic subset で $\dim\Sigma_W<\dim Q$ である。

次に条件 (2)(3)(4) をチェックしよう。明らかに条件(3)は(4)に含まれている。故に(2)(4)をチェックするとよい。

$j^r f(0) = z \in W$ なる $f \in C^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R})$ に対し，補題3.1によると，任意の点 $p \in \mathbb{R}^m$ に対して多項式 $h_p(x) = \sum_{|\omega| \leq r+2} a_\omega(p) x^\omega$ で次の条件をみたすものが存在する。

(5) $j^r h_p(0) = j^r f(0) = z$

(6) $j^1 h_p(0) = j^1 f(p)$

(7) $j^{r+2} h_0(0) = j^{r+2} f(0)$

条件(5)より h_p は次の形をしている。

$$h_p(x) = P_z(x) + \sum a_i(p) x^{\alpha_i} + \sum b_j(p) x^{\beta_j}$$

そのとき写像 $jf : \mathbb{R}^m \longrightarrow \Omega$ を次式で定義する。

(8) $jf(p) = (p, z, a_1(p), \ldots, a_\mu(p), b_1(p), \ldots, b_\nu(p))$

補題3.1によると jf は C^∞級である。次の性質を得る。

(10) jf は Q に transversal

(11) $f^{-1}(0) = jf^{-1}(\bar{Q})$

(12) $C(f) = f$ の特異点の集合 $= jf^{-1}(S)$

(2)の証明. $j^{r+2} f(0) = jf(0) \in Q - \Sigma_W$ とする。codim Q in $\Omega = m =$ codim S in Ω，かつ $j^{r+2} f(0) = jf(0)$ の属する Q の strata の codimension も m，従って $jf(0)$ の近くには $S - Q$ の

strata は存在しない。故に原点の近傍では，(12)より，

$$C(f) = jf^{-1}(S) = jf^{-1}(Q) = \{0\}$$

となり 原点は f の孤立特異点である。

(4)の証明。 $j^{r+2}f(0),\ j^{r+2}g(0)$ が $\pi^{-1}(W)-\Sigma_W$ の同じ連結成分に属すとする。 f_t を $f_0=f,\ f_1=g$ かつ $j^{r+2}f_t(0)\in\pi^{-1}(W)-\Sigma_W$ なる smooth なホモトピーとする。 そのとき， $I=(-\varepsilon,1+\varepsilon)$ とおき，

$$F : \mathbb{R}^m\times I \longrightarrow \mathbb{R}\times I \quad を \quad F(x,t)=(f_t(x),t)$$

$$\pi : \mathbb{R}\times I \longrightarrow I \quad を \quad \pi(y,t)=t$$

$$jF : \mathbb{R}^m\times I \longrightarrow \Omega \quad を \quad jF(x,t)=jf_t(x)$$

で定義する。 F が C^∞ 級であるように f_t はとれる。

$j^{r+2}f_t(0)\in Q-\Sigma_W$ で jF は Ω の全ての strata に横断的なので $\mathbb{R}^m\times I$ に Ω からの induced stratification を入れることができる。 $\mathbb{R}\times I$ に

$$\mathcal{S}(\mathbb{R}\times I)=\{0\times I,\ (\mathbb{R}-\{0\})\times I\}$$

なる自然な stratification を入れると， F は Thom-map over π となり， 2nd-isotopy lemma より f と g は C^0-同値。

$$\begin{tikzcd}
\mathbb{R}^m\times I \arrow[r, "F"] \arrow[d, "jF"] & \mathbb{R}\times I \arrow[r, "\pi"] & I \\
\Omega & &
\end{tikzcd}$$

Q.E.D

§4 写像芽の場合の主定理の証明

$s > r$ のとき、$\pi = \pi^s_r : J^s(m,n) \longrightarrow J^r(m,n)$ を自然な写影とする。

補題4.1 $W \subset J^r(m,n)$, $X \subset J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ を任意の semi-algebraic set とする。そのとき $(\pi^{r+k+1}_r)^{-1}(W)$ の中の closed semi-algebraic set $\Sigma = \Sigma(X, W)$ が存在して次の条件をみたす:

(1) $\dim \Sigma < \dim \pi^{-1}(W)$

(2) $j^{r+k+1} f(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma \Rightarrow j^k f : \mathbb{R}^m \to J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ は(原点を除いて)原点の近傍で X に横断的

(3) $\operatorname{codim} X = m \Rightarrow j^k f^{-1}(X) \cap U = \{0\}$ or ϕ

for some small neighborhood U.

証明 定理3.2と同様の考察をくりかえす。$z \in W \subset J^r(m,n)$ とし、z が r 次の多項式写像 $(y_1, \dots, y_n) = (P_{1,z}(x), \dots, P_{n,z}(x))$ で代表されているとする。$s = r+k+1$ とおく。

$$(\pi^s_r)^{-1}(W) = \{ \text{多項式写像}(y_1, \dots, y_n) ; y_j = P_{j,z}(z) + \sum_{r<|\omega|\le s} a_j^{\omega} x^{\omega} \}$$

$$\Big\updownarrow \ 1対1$$

$$W \times \mathbb{R}^{n \times \nu} = \{ (z, a_1^{\omega_1}, \dots, a_1^{\omega_\nu}, a_2^{\omega_1}, \dots, a_n^{\omega_1}, \dots, a_n^{\omega_\nu} \}$$

, 但し $\nu = \sum_{l=r+1}^{s} (m+l-1)!/l!(m-1)!$

$$\Omega = \{(x, z, a_i^\omega)\} = \mathbb{R}^m \times W \times \mathbb{R}^{n\times\nu}$$

$$j_\Omega : \Omega \longrightarrow J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$$ を

$$j_\Omega(x, z, a_i^\omega) = j^k(P_z + \sum a^\omega x^\omega)(x)$$

で定義する。$P_z = (P_{1,z}, \ldots P_{n,z})$ は z を代表する多項式。

補題3.1 によると j_Ω は

$$Q = \{(0, z, a_i^\omega)\} = 0 \times W \times \mathbb{R}^{n\times\nu}$$

以外では submersion になっている。(ie, $j_\Omega|_{\Omega - Q}$ が submersion). 又 j_Ω は多項式写像, X は semi-algebraic なので $X^* = j_\Omega^{-1}(X) - Q$ は semi-algebraic manifold としてよい。pair X^* と Q が Whitney の条件をみたさぬ Q の点を Σ とおくと これが補題 3.1 の求めるものである。(もちろんここで Q と $\pi^{-1}(W)$ は同一視している。)

実際, $f \in C^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ が $j^s f(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma$ とする。f に対して $jf : \mathbb{R}^m \to \Omega$ を

$$jf(p) = (p, j^s f(0), a_i^\omega(p))$$

とおく。但し, $a_i^\omega(p)$ は f と p に対して, 補題3.1で保障された多項式写像の係数である。次の性質を得る。

(4) jf は Q に横断的

(5) $j^k f = j_\Omega \circ (jf)$

(6) $jf^{-1}(X^*) = jf^{-1}(X) - \{0\}$

今 $j^r f(0) \in Q - \Sigma$ かつ $(Q - \Sigma)$ と X^* は Whitney の条件をみたすので (4) より

(7) jf は X^* に transversal

j_Ω が submersion なることと (5), (7) より 補題4.1 が証明された。

Q.E.D.

補題4.2. 整数 r, m, n に対して $s = s(r, m, n)$ を 6頁の (*) で与えられる数とする。任意の semi-algebraic set $W \subset J^r(m, n)$ に対して closed semi-algebraic set $\Sigma \subset (\pi^s_r)^{-1}(W)$ が存在して次の条件をみたす。

(1) $\dim \Sigma < \dim (\pi^s_r)^{-1}(W)$

(2) $j^s f(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma \Rightarrow f$ の特異点集合 $C(f)$ は stratification $\mathcal{S}(C(f))$ をもち、任意の strata $X \in \mathcal{S}(C(f))$ に対して $f|X : X \longrightarrow \mathbb{R}^n$ は immersion となる。

証明. まず, Thom-Boardman singularity $\Sigma^{i_1 \cdots i_k} \subset J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$, $i_k \neq 0$, で $\operatorname{codim} \Sigma^{i_1 \cdots i_k} \leq m$ なるものが存在す

る sequence $(i_1, \cdots i_k)$ の最大の長さ $k = k(m, n)$ を求める。

$m \leq n$ の場合は $\operatorname{codim} \Sigma^{\overbrace{1, \cdots 1}^{k}} = m$ となる k

$m \geq n$ の場合は $\operatorname{codim} \Sigma^{\overbrace{m-n+1, \cdots 1}^{k}} = m$ となる k

がそうである。J. Boardman [B_1] によると，それは

$$(3) \quad k = k(m, n) = \begin{cases} [m/n-m+1] & \text{if } m \leq n \\ n & \text{if } m \geq n. \end{cases}$$

となる。以下議論は同じなので $m \geq n$ の場合に証明する。

$$S_1 = \text{closure of } \Sigma^{m-n+1} \subset J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$$

$$S_2 = \bigcup_{\operatorname{codim} \Sigma^I > m} \Sigma^I \quad \subset J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$$

とおくと，S_2 は $\operatorname{codim} > m$ の $J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ の algebraic subset である。$S_1 - S_2$ を次の形の Thom-Boardman singularity の和集合に分割できる。

$$(4) \quad S_1 - S_2 = \Sigma^{\underbrace{m-n+1, 1, \cdots, 1}_{k}} \cup \bigcup \Sigma^{i_1, \cdots, i_{k-1}, 0}$$

$S_1 - S_2$ の stratification で $\{\Sigma^{m-n+1, 1, \cdots 1}, \Sigma^{i_1, \cdots i_{k-1}, 0}\}$ を細分して得られるものが存在する。$S_1 - S_2$ の semi-algebraicity から $S_1 - S_2$ の stratification $\mathcal{S}(S_1 - S_2)$ の strata の数は有限個である。補題 4.1 によると $(\pi_{\hat{c}})^{-1}(W)$ の semi-algebraic set Σ で $\dim \Sigma < \dim \pi^{-1}(W)$ で，$j^k f(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma \Rightarrow j^k f$ は $\mathcal{S}(S_1 - S_2)$ の strata に transverse である

ようなものが存在する。このΣが求めるものである。

実際　$j^0 f(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma$　とする。

(5) $C(f) = (j^k f)^{-1}(S_1)$

なので，$C(f)$の stratification を

(6) $\mathcal{S}(C(f)) = \{0\} \cup \{(j^k f)^{-1}(X) - \{0\} \mid X \in \mathcal{S}(S_1 - S_2)\}$

とおけばよい。$f|\{0\} : \{0\} \to \mathbb{R}^n$ は明らかに immersion.

又 $\operatorname{codim} \Sigma^{m-n+1,1\cdots1} = m$ なので $X \subset \Sigma^{m-n+1,1\cdots1}$ ならば

補題4.1より，$(j^k f)^{-1}(X) - \{0\} = \phi$.　一方 $X \subset \Sigma^{i_1 \cdots i_k, 0}$

ならば $f|(j^k f)^{-1}(X)$ が immersion であることは，$\Sigma^{i_1 \cdots i_k, 0}$

の定義と横断性より明らかである。(see [B])

<u>補題 4.2 Q.E.D.</u>

<u>補題4.3</u>　X, Y $\subset \mathbb{R}^{n+k}$ を二つの submanifolds, $\pi : \mathbb{R}^{n+k} \to \mathbb{R}^k$ を自然な射影とする。次の条件をみたすとする。

(1) $Y \supset \partial X$ で pair (X, Y) は Whitney の条件 (b) をみたす。

(2) $\pi(X)$, $\pi(Y)$ は $\mathbb{R}^n$ の submanifold で $\pi|X : X \to \pi(X)$ 及び $\pi|Y : Y \to \pi(Y)$ は submersion.

そのとき $\Longrightarrow$

(3) pair $(\pi(X), \pi(Y))$ は Whitney の条件 (b) を満す。

証明 "pair (X, Y) が Whitney の条件を点 $y \in Y$ で満たす" とは "y に収束する X の点列 $\{x_i\}$ と Y の点列 $\{y_i\}$ に対し，x_i と y_i を結ぶ直線 $\widehat{x_i y_i}$ がある直線 l に収束し，$T_{x_i}(X)$ がある空間 τ に収束するならば，

$$(4) \qquad \tau > l$$

となる" であった。所で条件(4)は次の条件(5)と同値である。

$$(5) \qquad \lim_{n \to \infty} \arg\left(\widehat{x_n y_n}, T_{x_n}(X)\right) = 0$$

ここに $\arg$ は角度をいみする。Whitney の条件(b)を(5)で定式化すると補題 4.3 は明白である。

Q.E.D.

主定理(＝定理2.3)の証明.

$\Sigma = \Sigma_W$ を補題 4.2 で得られるそれとする。定理 2.3 における条件 (1), (2) は補題 4.2 から自明である。(3) を証明する長い旅路に出よう。

整数 N を充分多きくとっておく。例えば $N > \max(m, n)$

$$J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N = J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n) \times \cdots \times J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$$

とおく。但し $k = k(m, n)$ は P18 の式(3)で与える。

$$\Omega = \{(x, z, a_i^{(\omega)})\} = \mathbb{R}^m \times W \times \mathbb{R}^{n\times\nu} = \mathbb{R}^m \times \pi^{-1}(W)$$

を補題4.1の証明の中で与えたものとする。

$$\Omega^N = \Omega \times \cdots \times \Omega \qquad (\text{N個のコピーの直積})$$

とおく。

集合 $\{1, \ldots, N\}$ の部分集合 $\sigma = \{\sigma_1, \ldots, \sigma_\ell \mid \sigma_1 < \sigma_2 < \cdots < \sigma_\ell\}$ に対して

$$\Delta_\sigma = \{(y_1, \ldots, y_N) \in \mathbb{R}^n \times \cdots \times \mathbb{R}^n \mid y_{\sigma_1} = \cdots = y_{\sigma_\ell}\}$$

とおく．同じ記号で

$$\Delta_\sigma \equiv (\pi^N_{\mathbb{R}^n})^{-1}(\Delta_\sigma)$$

をあらわす，但し $\pi^N_{\mathbb{R}^n} : J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N \to \mathbb{R}^{nN} = \mathbb{R}^n \times \cdots \times \mathbb{R}^n$ は自然な射影。

$$\mathcal{S}(\Sigma, \Delta) = \{\Sigma^{I_1} \times \cdots \times \Sigma^{I_N}, \Delta_\sigma \mid$$ ここに Σ^{I_ℓ} は全ての Thom-Boardman singularity，$\sigma \subset \{1, \ldots N\}$ をわたりあるく $\}$ とおく。

すると $J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N$ の stratification で集合族 $\mathcal{S}(\Sigma, \Delta)$ を細分して得られる最大のもの $\underline{\mathcal{S}(J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N)}$ が存在する。所で $j_\Omega : \Omega \to J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ は Q 以外ではsubmersionであったので

$$j_\Omega^N = j_\Omega \times \cdots \times j_\Omega : \Omega^N \longrightarrow J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N$$

は $\Omega^N - Q(N)$ 上でsubmersionである。ここに $\pi_{i\text{-}\Omega} : \Omega^N \to \Omega$ を才 i 成分への射影とするとき，$Q^{(N)} = \bigcup \pi_{i\text{-}\Omega}^{-1}(Q)$.

従って $\Omega^N - Q^{(N)}$ には $\mathcal{S}(J^k(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)^N)$ を j_Ω^N でひきもどしてえられる stratification $\mathcal{S}(\Omega^N - Q^{(N)})$ がある。

$$\Sigma^{(N)} = \pi_{i\Omega}^{-1}(\Sigma)$$

とおくとき，Ω^N の の stratification で次の条件をみたすものが存在する。

(1) $\mathcal{S}(\Omega^N)$ は $\{\mathcal{S}(\Omega^N - Q^{(N)}), Q^{(N)}, \Sigma^{(N)}\}$ を細分したもの

さて，f, g を $j^k f(0), j^k g(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma$ なる写像芽とする。f_t を $f_0 = f$，$f_1 = g$ なるホモトピーで $j^k f_t(0) \in \pi^{-1}(W) - \Sigma$ なるものとする。

$$F : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \quad ; \quad F(x, t) = (f_t(x), t)$$

$$jF : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} \longrightarrow \Omega \times \mathbb{R} \quad ; \quad jF(x, t) = (jf_t(x), t)$$

$$jF^N : \mathbb{R}^m \times \cdots \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} \longrightarrow \Omega^N \times \mathbb{R} \ ; \ jF^N(x_1, \ldots x_N, t) = (\cdots, jf_t(x_N), t)$$

で定める。補題4.1の証明中に見た如く，

(2) jF^N は $Q \times \cdots \times Q \times \mathbb{R}$ に横断的である

従って，$\Omega^N \times \mathbb{R}$ に $\mathcal{S}(\Omega^N)$ から induce される自然な stratification $\mathcal{S}(\Omega^N \times \mathbb{R})$ を入れると

(3) jF^N は $\mathcal{S}(\Omega^N \times \mathbb{R})$ の全ての strate に横断的

となる。従って ~~$jF^N($~~

(4) $jF^N(\mathbb{R}^m\times\cdots\times\mathbb{R}^m\times\mathbb{R})$ には $\mathcal{S}(\Omega^N\times\mathbb{R})$ から induce された stratification $\mathcal{S}(jF^N(\mathbb{R}^{mN}\times\mathbb{R}))$ が存在する。

一方 $\tilde{j}_\Omega^N : \Omega^N\times\mathbb{R}\longrightarrow J^k(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}^n)^N\times\mathbb{R}$ を $\tilde{j}_\Omega^N(p_1,\dots,p_N,t) = (j_\Omega(p_1),\dots,j_\Omega(p_N),t)$ で与えるとき $\tilde{j}_\Omega^N$ は $\Omega^{(N)}\times\mathbb{R}$ 以外では submersion 従って 等式

(5) $(j^kF)^N = \tilde{j}_\Omega^N\circ jF^N$

が成立つ。但し $(j^kF)^N = j^kF\times\cdots\times j^kF : \mathbb{R}^m\times\cdots\times\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}\rightarrow J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N\times\mathbb{R}$ は $(x_1,\dots,x_n,t)\longrightarrow(j^kf_t(x_1),\dots,j^kf_t(x_N),t)$。

$J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N\times\mathbb{R}$ に $\mathcal{S}(J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N)$ から自然に induce される stratification $\mathcal{S}(J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N\times\mathbb{R})$ を入れる。

(6) $\pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}} : J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N\times\mathbb{R}\longrightarrow\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$

を $\pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}}(j^kf_1(p_1),\dots,j^kf_N(p_N),t)=(f_1(p_1),t)$ なる自然な射影とする。 N を充分大きくとっておくと、

(7) $X,Y\in\mathcal{S}(jF^N((\mathbb{R}^m)^N\times\mathbb{R}))$ に対して

$\pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}}\circ\tilde{j}_\Omega^N(X)\cap\pi_{\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}}\circ\tilde{j}_\Omega^N(Y)\neq\phi \overset{ならば}{\Longrightarrow} \pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}}\circ\tilde{j}_\Omega^N(X)$
$= \pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}}\circ\tilde{j}_\Omega^N(Y)$ が成立つ

(これは $J^k(\mathbb{R}^m,\mathbb{R}^n)^N$ の stratification が $\mathcal{S}(\Sigma,\Delta)$ の細分であったので (p21 参照).)

従って　補題3.3より

$$(8)\quad \mathcal{S}(\mathrm{Image}\,F) = \{\pi_{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}}\circ \widetilde{j_\Omega^N}(X) \mid X \in \mathcal{S}(jF^N(\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}))\}$$

は Image $F \subset \mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$ のstratificationを与える。Image F は $\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$ のclosed 集合として一般性を失なわぬので,

$$(9)\quad \mathcal{S}(\mathrm{Image}\,F)\cup\{\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}-\mathrm{Image}\,F\} = \mathcal{S}(\mathbb{R}^n\times\mathbb{R})$$

は $\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$ の stratification を与える。

一方 (2)(3) より, $\mathbb{R}^m\times\mathbb{R}$ には jF により $\mathcal{S}(\Omega^N\times\mathbb{R})$ のstratification を入れることができる。所でこの stratification を細分して,

$$F : \mathbb{R}^m\times\mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$$

が, $\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}$ の stratification を(9)で与えたとき, stratified map になるようにできる。

$$(10)\quad \mathbb{R}^m\times\mathbb{R} \xrightarrow{F} \mathbb{R}^n\times\mathbb{R} \xrightarrow{\pi} \mathbb{R}$$

は 定理の中の条件(2)(それはすでに証明された) より Thom map であり, 従って isotopy lemma より $f_0=f$ と $f_1=g$ は C^0-同値となる。

定理2.3証明完了.

以上.

文　献

[B] J. Boardman. Singularities of diff. maps. Publ. Math I.H.E.S. 33. (1967) 21-57

[F1] T. Fukuda. Topologically stable unfoldings について. 数理研講究録. No 257 "C^∞ 写像のトポロジー"

[F2] ———. Types topologiques des polynômes. to appear in Publ. Math. I.H.E.S No 46

[M] J. Mather. Notes on topological stability. mimeographed Harv. Univ.

[T] R. Thom. Local topological properties of diff. maps Colloq. on Differential Analysis. Oxford Univ. Press.